

**LABORATÓRIO VIRTUAL PARA SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE PROCESSOS
INDUSTRIAIS**

**LABORATORIO VIRTUAL DE SIMULACIÓN DE CONTROL DE PROCESOS
INDUSTRIALES**

**VIRTUAL LABORATORY FOR SIMULATION OF INDUSTRIAL PROCESS
CONTROL**

Ian Ribeiro Nascimento¹; Fábio Guilherme de Andrade Soares²; Valdenio João Francisco José Lima de Souza³
Alexander Patrick Chaves de Sena⁴; Alysson Domingos Silvestre⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.VIIICOINTERPDVGT.0014>

RESUMO

O presente relatório vai abordar o desenvolvimento e aplicação de um laboratório virtual para simulação do controle de processos industriais, focado em controladores do tipo On/Off, PID e Fuzzy. Utilizando o software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), o ambiente virtual permite a simulação e análise de um sistema de controle aplicado a um tanque, sendo a planta do sistema. O objetivo principal é proporcionar uma ferramenta educacional e de pesquisa que facilite a compreensão e experimentação de técnicas de controle em um ambiente seguro e flexível. Os controladores On/Off são os mais simples, operando com base em dois estados: ligado ou desligado, sendo utilizados para aplicações onde a precisão não é crítica. O controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) é amplamente utilizado na indústria devido à sua capacidade de ajustar os parâmetros de controle de forma precisa, proporcionando estabilidade e resposta rápida ao sistema. Já o controlador Fuzzy, baseado em lógica fuzzy, oferece uma abordagem mais flexível e adaptativa, ideal para sistemas complexos e não lineares. O LabVIEW, com sua interface gráfica intuitiva, se destaca como uma plataforma robusta para simulações. Ele permite que engenheiros e pesquisadores criem modelos complexos e visualizem resultados em tempo real, facilitando a análise e o ajuste dos sistemas em desenvolvimento. Na simulação de um tanque controlado por diferentes estratégias de controle, o LabVIEW possibilita a comparação detalhada do desempenho de cada controlador. Isso inclui a avaliação de parâmetros cruciais como o tempo de resposta, estabilidade, precisão e a capacidade do sistema de se adaptar a mudanças nas condições operacionais. Essa abordagem não só otimiza o processo de desenvolvimento, como também permite uma melhor compreensão das vantagens e limitações de cada método de controle, contribuindo para a escolha da solução mais eficiente para o sistema em questão.

Palavras-chave: Laboratório Virtual, Simulação de controle, Automação industrial.

RESUMEN

Este informe aborda el desarrollo y aplicación de un laboratorio virtual para la simulación del control de procesos industriales, enfocado en controladores On/Off, PID y Fuzzy. Utilizando el software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), el entorno virtual permite la

1 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), irm@discente.ifpe.edu.br

2 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), fgas.@discente.ifpe.edu.br

3 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), vjfls.@discente.edu.br

4 Doutor em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), alexander.sena.@caruaru.ifpe.edu.br

5 Doutor em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), alysson.silvestre@caruaru.ifpe.edu.br

simulación y análisis de un sistema de control aplicado a un tanque, siendo el plano del sistema. El objetivo principal es proporcionar una herramienta educativa y de investigación que facilite la comprensión y experimentación de técnicas de control en un entorno seguro y flexible. Los controladores de encendido/apagado son los más simples, funcionan en función de dos estados: encendido o apagado, y se utilizan para aplicaciones donde la precisión no es crítica. El controlador PID (Proporcional, Integral, Derivado) es ampliamente utilizado en la industria debido a su capacidad para ajustar los parámetros de control de manera precisa, brindando estabilidad y rápida respuesta al sistema. El controlador Fuzzy, basado en lógica difusa, ofrece un enfoque más flexible y adaptativo, ideal para sistemas complejos y no lineales. LabVIEW, con su interfaz gráfica intuitiva, se destaca como una plataforma robusta para simulaciones. Permite a ingenieros e investigadores crear modelos complejos y visualizar resultados en tiempo real, lo que facilita el análisis y ajuste de los sistemas en desarrollo. Al simular un tanque controlado por diferentes estrategias de control, LabVIEW permite una comparación detallada del desempeño de cada controlador. Esto incluye la evaluación de parámetros cruciales como el tiempo de respuesta, la estabilidad, la precisión y la capacidad del sistema para adaptarse a las condiciones operativas cambiantes. Este enfoque no sólo optimiza el proceso de desarrollo, sino que también permite una mejor comprensión de las ventajas y limitaciones de cada método de control, contribuyendo a la elección de la solución más eficiente para el sistema en cuestión.

Palabras clave: Laboratorio Virtual, Simulación de control, Automatización industrial.

ABSTRACT

This report will address the development and application of a virtual laboratory for simulating industrial process control, focused on On/Off, PID and Fuzzy controllers. Using LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) software, the virtual environment allows the simulation and analysis of a control system applied to a tank, which is the plant of the system. The main objective is to provide an educational and research tool that facilitates the understanding and experimentation of control techniques in a safe and flexible environment. On/Off controllers are the simplest, operating based on two states: on or off, and are used for applications where precision is not critical. The PID (Proportional, Integral, Derivative) controller is widely used in industry due to its ability to adjust control parameters accurately, providing stability and fast response to the system. The Fuzzy controller, based on fuzzy logic, offers a more flexible and adaptive approach, ideal for complex and non-linear systems. LabVIEW, with its intuitive graphical interface, stands out as a robust platform for simulations. It enables engineers and researchers to create complex models and visualize results in real time, facilitating the analysis and adjustment of systems under development. When simulating a tank controlled by different control strategies, LabVIEW enables detailed comparison of the performance of each controller. This includes the evaluation of crucial parameters such as response time, stability, accuracy, and the system's ability to adapt to changing operating conditions. This approach not only streamlines the development process, but also allows for a better understanding of the advantages and limitations of each control method, contributing to the selection of the most efficient solution for the system in question.

Keywords: Virtual Laboratory, Control Simulation, Industrial Automation.

INTRODUÇÃO

A presença do controle automático é um componente importante e intrínseco em sistemas para veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão etc. (OGATA, 2014, p. 1). Pensando nisso a elaboração de um laboratório virtual faz-se necessária em instituições que não possuem uma estrutura para o estudo destes processos de porte industrial, sua análise é fundamental para resolução de problemas reais. A

estrutura responsável por coordenar os resultados da máquina são os sistemas de controle. “Um sistema de controle é estruturado em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada” (SIMÕES, 2007). Além disso o sistema de controle precisa ser expresso em um diagrama de bloco, que possui certos componentes necessários para atuar de fato no objeto de estudo, no qual serão utilizados no software de simulação LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) que será usada como ferramenta para a construção do laboratório virtual. O desenvolvimento de Plantas industriais com sistemas de controle em malha fechada utilizando controladores do tipo PID, Fuzzy e On/Off é um recurso didático fundamental para a comparação dos resultados que cada um tivera no ambiente de simulação no qual a implementação física dos mesmo em uma planta gerariam custos para a instituição de ensino e/ou capacitação de funcionários, portanto um ambiente virtual de caráter teórico geraria eficiência e eficácia no aprendizado destes processos que são essenciais ao setor industrial.

DESENVOLVIMENTO

Teoria e Simulação no Ensino de Controle de Processos

No contexto atual, o controle de sistemas é uma área de extrema fidelidade, com aplicações em diversas áreas, como engenharia, automação, robótica e industrial. Nesse contexto, os controladores exercem um papel fundamental, permitindo o gerenciamento e ajustando os sistemas de acordo com as demandas e metas estabelecidas. Entre os diferentes tipos de controladores, destacam-se o On/Off, PID (Proporcional-Integral-Derivativo) e o crescimento de aplicações com Fuzzy, cada um com suas características e capacidades específicas.

Para uma formação completa de técnicos, tecnólogos e engenheiros, é necessário que no processo de ensino e aprendizagem da disciplina de Controle de Processos exista uma efetiva integração entre a teoria e a simulação, não esquecendo, é claro, da experimentação prática. Todavia, um dos problemas dessa integração está precisamente no componente prático, desprovido do desenvolvimento de kits de aplicação didática, que comumente demanda altos investimentos financeiros (LIMA et al, 2007).

Segundo Ogata (2010), o controlador On/Off é uma forma simples de controle que atua como um interruptor, ligando ou desligando o sistema com base em um limiar predefinido. Já o controlador PID utiliza o modelo matemáticos de erros passados, presentes e futuros para ajustar a ação de controle de forma mais precisa, conforme descrito por Astrom e Murray (2008). Por sua vez, o controlador FUZZY, baseado na teoria dos conjuntos fuzzy, permite a

modelagem de entrelaçados e ambiguidades, fornecendo uma lógica de controle mais flexível e adaptativa, de acordo com Ross (2010).

Com o objetivo de aprimorar o entendimento e a análise desses controladores, é essencial contar com ferramentas de simulação que podem avaliar o desempenho e comportamento de cada um deles em diferentes cenários e condições. Nesse contexto, a proposta deste projeto de iniciação científica é projetar implementar e um simulador virtual capaz de reproduzir o funcionamento dos controladores On/Off, PID e Fuzzy em aplicações de controle de processos Industriais.

De acordo com Franklin, Powell e Emami-Naeini (2014), a utilização de simuladores virtuais é uma abordagem eficaz para o estudo e desenvolvimento de sistemas de controle. Essas ferramentas permitem a análise de diferentes estratégias de controle, ajuste de parâmetros e a simulação de respostas em tempo real, sem a necessidade de recursos físicos. Além disso, a simulação possibilita a avaliação do desempenho dos controladores em cenários diversos, como sistemas instáveis, não-lineares ou com restrições operacionais.

Metodologia para Análise de Controladores

A análise de sistemas requer a definição de uma metodologia robusta, especialmente em contextos que envolvem a interação de múltiplos subsistemas. Neste estudo, o foco reside na avaliação do comportamento dos controladores implementados em uma planta de tanque, reconhecendo que a aplicabilidade de cada controlador pode variar significativamente de um sistema para outro. Cada controlador deve adaptar-se às particularidades da planta na qual é implementado, e essa implementação pode ser realizada de diversas maneiras, mesmo para uma mesma planta. Portanto, a utilização de uma metodologia é crucial para a realização de uma análise precisa e fundamentada.

A primeira etapa envolveu a escolha do sistema industrial a ser analisado, bem como a seleção do controlador a ser implementado. Neste contexto, foi essencial realizar um levantamento bibliográfico detalhado sobre o controlador escolhido, com o intuito de compreender as abordagens mais adequadas para sua adequação e os resultados esperados durante os testes. A implementação e sintonia do controlador exigem um modelamento matemático da planta, sendo fundamental o domínio sobre o funcionamento da planta e suas variáveis de controle. Nesse sentido, as variáveis que serão manipuladas pelo sistema de controle precisam ser identificadas e modeladas matematicamente.

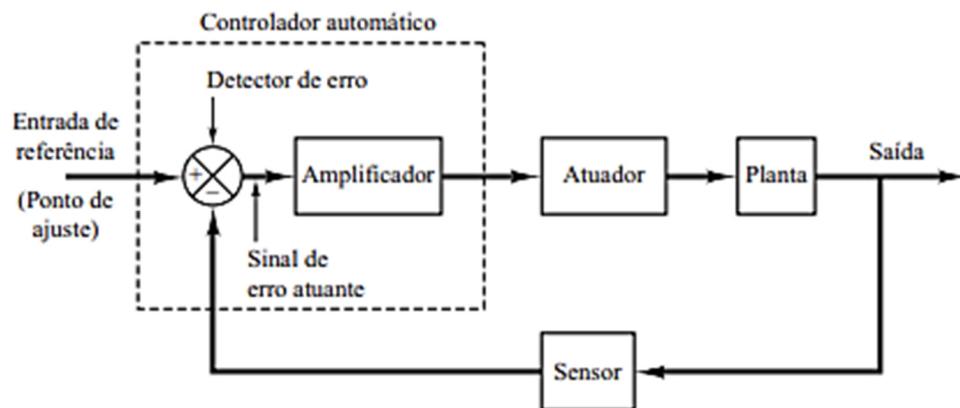
Com a modelagem matemática estabelecida, iniciou-se o desenvolvimento do ambiente virtual, onde a planta e os controladores serão integrados. Após a construção do ambiente

virtual, são realizados experimentos para observar o comportamento dos controladores em questão. Os resultados obtidos são então analisados em relação à literatura previamente revisada, permitindo a comparação entre a resposta teórica e prática.

A representação visual do sistema é uma ferramenta indispensável para a compreensão do funcionamento do mesmo, tanto para o leitor quanto para o autor. Na teoria de controle, os diagramas de bloco são frequentemente utilizados para essa finalidade. Segundo Dorf (2001), “os sistemas dinâmicos que abrangem os sistemas de controle automático são representados matematicamente por um conjunto de equações diferenciais simultâneas... Como os sistemas de controle dizem respeito ao controle de variáveis específicas, isto requer a inter-relação entre as variáveis controladas e as variáveis de controle. Esta relação é representada tipicamente pela função de transferência do subsistema que relaciona variáveis de entrada e de saída.”

Esses diagramas fornecem uma representação clara do modelamento matemático de cada componente que compõe o processo e das interações entre eles. A relação que ocorre entre os blocos do processo é descrita por uma função de transferência, que estabelece a conexão entre a entrada do usuário e a saída do sistema, facilitando a análise e compreensão do comportamento dinâmico do sistema em estudo. A Figura (1) apresenta um típico diagrama de blocos de um sistema industrial.

Figura 1: Diagrama de blocos de um sistema de controle industrial, que consiste em um controlador automático, um atuador, uma planta e um sensor (elemento de medição).



Fonte: Ogata Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5ª ed. São Paulo, 2010. p. 18,

O esboço do diagrama de bloco de um sistema de controle em malha fechada, onde os dados que o sensor capta da planta são enviados para o controlador que vai mensurar o erro que a máquina possui em um dado momento, um sistema retroalimentativo tem por objetivo minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado. Além disto há também sistemas

em malha aberta onde não há a retroalimentação de dados.

“Simulação é um processo que envolve o uso de software para recriar e analisar o comportamento de sistemas dinâmicos. Você usa o processo de simulação para reduzir os custos de desenvolvimento de produtos, acelerando o desenvolvimento de produtos. Você também usa o processo de simulação para fornecer insights sobre o comportamento de sistemas dinâmicos que você não pode replicar convenientemente no laboratório.” (HALVORSEN, 2011).

Para criação do ambiente virtual é essencial a utilização de uma plataforma virtual, fora escolhido o software de automação e controle LabVIEW como ferramenta, que possui linguagem de programação em blocos ‘G’, que oferece vantagens em aquisição e manipulação de dados. O primeiro passo no projeto de um sistema de controle é a obtenção de um modelo matemático da planta ou do objeto a ser controlado no nosso caso seria um sistema de vazão com rigor físico. Na realidade, qualquer modelo de uma planta que quisermos controlar incluirá um erro no processo de modelagem. Ou seja, a planta real será diferente do modelo a ser usado no projeto do sistema de controle. (OGATA, 2014).

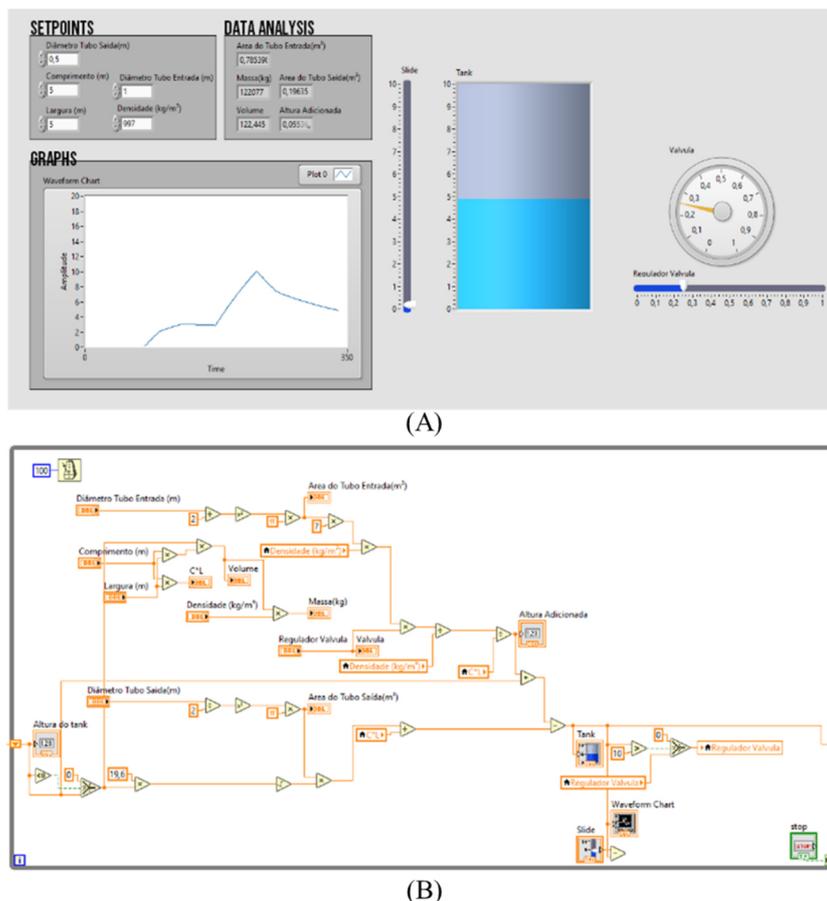
A elaboração da planta exigiu uma base teórica bem fundamentada, foram postos em prática conceitos relacionados a Mecânica dos Fluidos e Movimento Oscilatório Simples, A rigor a planta da máquina foi construída apenas com a presença da emulação de conceitos físicos, foi utilizado o livro Fundamentos de Física Volume II por David Halliday.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem e Simulação de uma Planta de Tanque

A presença da planta simulada é fundamental para a análise do sistema, mesmo que esta não consiga replicar todos os aspectos físicos de uma planta real. Entretanto, é possível obter dados relevantes para a análise a partir dessa simulação. A planta em estudo emula a vazão de um tanque que é preenchido com um fluido ideal. Na parte superior, há uma tubulação com vazão constante controlada por uma válvula, enquanto na parte inferior existe uma outra tubulação, cuja vazão varia de acordo com a quantidade de fluido presente no tanque. Além disso, fatores como o aquecimento do fluido e a pressão influenciam a densidade do líquido e, conseqüentemente, a sua vazão. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de uma função de transferência que correlacione essas variáveis de controle. Também é proposta a construção de uma planta de tanque para aplicação de controladores. A Figura (2) apresenta a simulação do processo no software LabVIEW, assim como o respectivo código-fonte utilizado.

Figura 2: a) Estrutura do processo Industrial, b) código fonte de simulação do tanque.



Fonte: Própria (2024).

O modelamento matemático do tanque foi realizado com base em princípios físicos reais, com o intuito de emular o comportamento do sistema no mundo real. Foram aplicados o Princípio da Continuidade, a Equação de Torricelli, a Primeira Lei da Termodinâmica e a Segunda Lei da Termodinâmica, possibilitando a correlação entre as variáveis de pressão, vazão, nível e temperatura. O modelo matemático resultante é denominado função de transferência, sendo responsável pelo processamento de sinais e pela análise da resposta do sistema a diferentes entradas. Além do desenvolvimento da planta do tanque, foram elaborados simuladores de sistemas de Primeira e Segunda Ordem, bem como um sistema Massa-Mola-Amortecimento, os quais são fundamentais para a análise e a compreensão completa do funcionamento dos controladores.

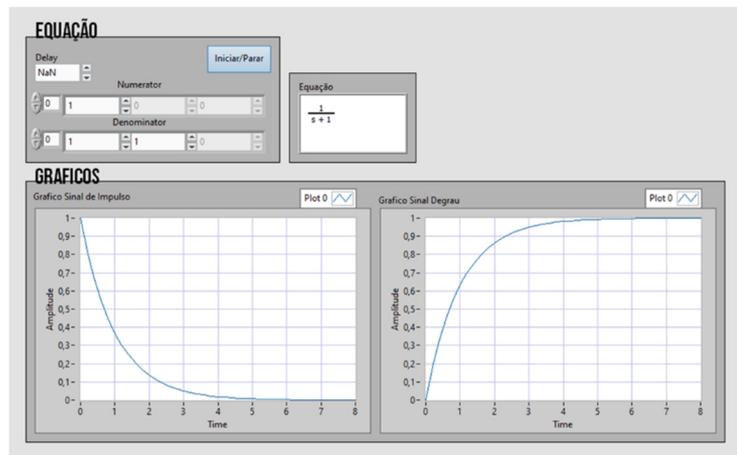
Sistema de Primeira e Segunda Ordem

Os sistemas de primeira e segunda ordem são caracterizados como sistemas dinâmicos cujo comportamento pode ser descrito por equações diferenciais ordinárias (EDO) de primeira ou segunda ordem. Esses sistemas apresentam sinais de entrada (input), sinais de saída (output)

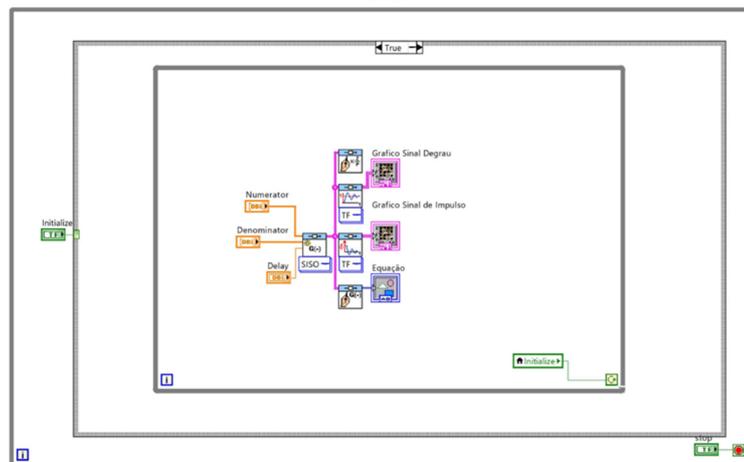
e um processo dinâmico pelo qual o sinal é processado. A inclusão desta seção em nosso laboratório tem como objetivo emular o comportamento da função de transferência da planta em estudo. No entanto, para tornar essa seção mais didática, é possível criar uma função de transferência na área destinada às equações e submetê-la a sinais de entrada do tipo degrau e impulso, permitindo uma análise mais clara do comportamento do sistema.

Para o desenvolvimento desta seção do laboratório, foi utilizado o módulo Control & Simulation do LabVIEW, conforme apresentado na Figura (3), o qual desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de sistemas de controle e simulação. Esse módulo permite integrar modelagem, simulação, projeto de controle, implementação e teste em um único ambiente gráfico de desenvolvimento. Além disso, a integração com hardware de aquisição de dados e controle da National Instruments facilita a transição entre o projeto teórico e a implementação prática, garantindo um fluxo de trabalho eficiente e eficaz.

Figura 3: a) Simulação de sistemas de 1º e 2º Ordens, b) código fonte da simulação destes sistemas.



(A)



(B)

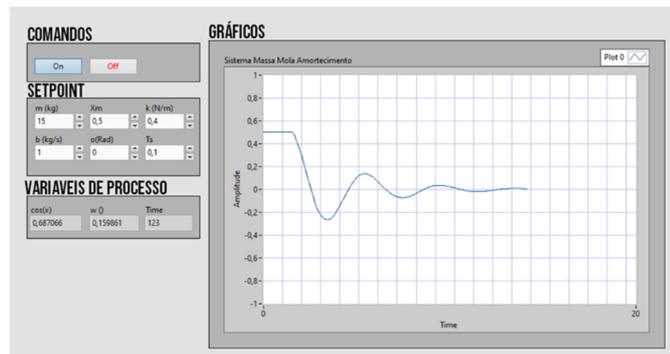
Fonte: Própria (2024).

A utilização desse módulo no LabVIEW simplifica a análise de sistemas dinâmicos de primeira e segunda ordem, proporcionando uma visualização mais clara para o ajuste dos parâmetros dos sistemas de controle. Isso resulta em uma melhor compreensão do comportamento dinâmico e facilita o projeto de controladores adequados ao sistema. Por exemplo, na Figura (3), foi inserida uma função de transferência de primeira ordem, submetida a sinais do tipo degrau e impulso. A resposta ao degrau evidencia como o sistema reage a uma mudança sustentada, enquanto a resposta ao impulso demonstra a reação do sistema a uma perturbação instantânea, oferecendo informações valiosas sobre seu comportamento dinâmico.

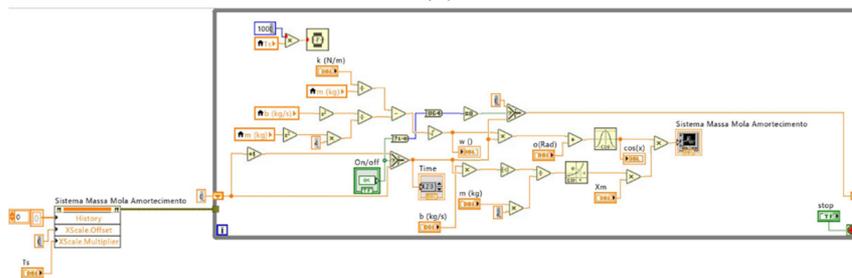
Sistema Massa-Mola-Amortecedor

O sistema massa-mola-amortecimento é um modelo físico amplamente utilizado para descrever o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos sujeitos a forças externas ou perturbações. Esse modelo é comumente aplicado em diversas áreas, como engenharia mecânica, controle de sistemas e análise estrutural. Devido às suas propriedades de resposta natural bem compreendidas, o sistema massa-mola-amortecimento também é empregado na comparação e análise de diferentes estratégias de controle, como PID, On/Off e Fuzzy, sendo uma ferramenta valiosa para avaliar a eficácia desses métodos em situações dinâmicas. A Figura (4) apresenta a simulação do sistema Massa-Mola-Amortecedor.

Figura 4: a) Simulação de sistemas Massa-Mola-Amortecedor, b) código fonte da simulação destes sistemas.



(A)



(B)

Fonte: Própria (2024).

O estudo destes tipos de sistema ajuda a entender como diferentes parâmetros afetam o comportamento dinâmico do sistema, tendo repostas diferentes a depender dos parâmetros, tais como os estados Subamortecido, Criticamente Amortecido e Superamortecido. Dependendo do coeficiente de amortecimento, o sistema pode exibir diferentes tipos de respostas. Este entendimento é crucial para projetar sistemas de controle que atendam a requisitos específicos de desempenho. Além disso sua presença pode ser encontrada em muitas aplicações reais tais como:

- Suspensões de Veículos: As suspensões de automóveis são projetadas usando os princípios de sistemas massa-mola-amortecimento para proporcionar conforto e estabilidade.
- Edifícios e Pontes: Sistemas de isolamento sísmico utilizam conceitos de massa-mola-amortecimento para mitigar os efeitos de terremotos.
- Sistemas Mecânicos e Elétricos: Muitos sistemas mecânicos e elétricos podem ser aproximados por modelos massa-mola-amortecimento para fins de análise e controle.

Controlador On/Off

O controlador On/Off é um dos tipos mais simples e amplamente utilizados em sistemas de controle, caracterizado por sua operação binária. Esse tipo de controlador alterna entre dois estados: ligado (On) e desligado (Off), dependendo da comparação entre a variável controlada e o valor de referência ou setpoint. No caso da planta em estudo, o controlador On/Off monitora a vazão do fluido, que é a variável controlada, em relação ao nível do tanque, que serve como setpoint. Com base nessa comparação, o controlador decide acionar ou desativar o atuador, regulando a vazão de entrada ou saída do fluido.

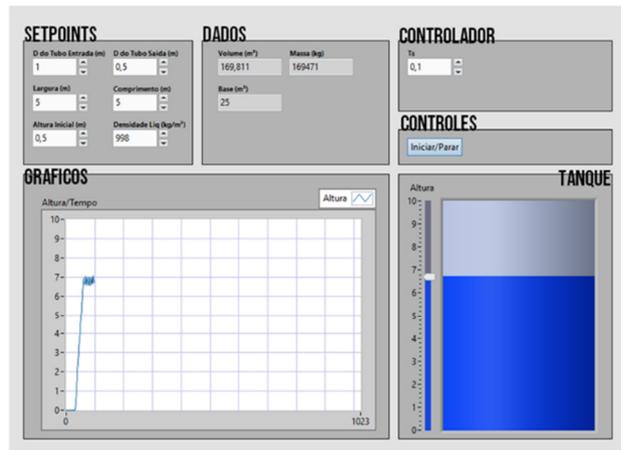
Apesar de sua simplicidade, o controlador On/Off apresenta algumas limitações, como a ocorrência de oscilações indesejadas em torno do setpoint, especialmente em sistemas com alta inércia ou retardos. Essas oscilações resultam do fato de o controlador operar de maneira abrupta, sem ajustar gradualmente o controle, o que pode levar a um comportamento intermitente do sistema. Trabalhos científicos sugerem que, em sistemas mais complexos ou que exijam maior precisão e estabilidade, o uso de controladores mais sofisticados, como o PID (Proporcional-Integral-Derivativo), pode ser preferível para melhorar a resposta dinâmica e minimizar oscilações.

No entanto, o controlador On/Off é amplamente utilizado em aplicações onde a simplicidade, o custo reduzido e a robustez são prioridades, como em sistemas de controle de temperatura, processos industriais simples e controle de nível de tanques. Sua eficácia em

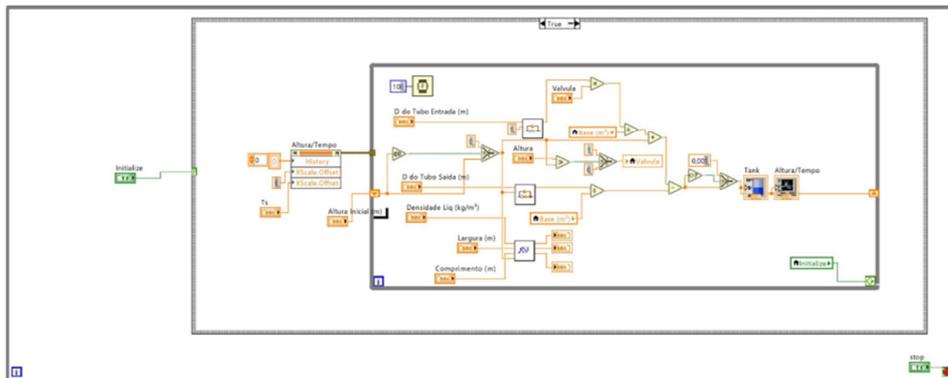
situações onde não se exige alta precisão torna-o uma escolha adequada para muitas aplicações práticas, sendo que melhorias como a introdução de histerese podem mitigar parte de suas limitações, diminuindo a frequência das oscilações e o desgaste do atuador.

Na planta em questão, Figura (5), a aplicação do controlador On/Off foi realizada considerando o setpoint estabelecido pelo usuário, permitindo o acionamento ou desativação da válvula responsável pela passagem do fluido ideal através da tubulação. Dessa forma, o controlador regula o nível do tanque, embora seja necessário levar em conta os possíveis efeitos adversos associados ao seu comportamento discreto e suas limitações em termos de precisão e desgaste dos componentes.

Figura 5: a) Simulação de Planta com Controlador On/Off, b) código fonte da simulação.



(A)



(B)

Fonte: Própria (2024).

As principais vantagens do controlador On/Off residem em sua simplicidade de operação, baixo custo de implementação e confiabilidade em aplicações que não exigem alta precisão. Sua estrutura binária o torna ideal para sistemas onde o controle contínuo não é essencial, facilitando sua aplicação em processos industriais de menor complexidade. No entanto, esse tipo de controlador apresenta desvantagens significativas, como a elevada

oscilação em torno do ponto de ajuste, o desgaste mecânico prematuro dos atuadores e a baixa precisão no controle de variáveis. Isso ocorre porque a alternância abrupta entre os estados “ligado” e “desligado” gera picos de tensão que podem sobrecarregar o equipamento, resultando em estresse mecânico e potencial falha a longo prazo.

Controlador PID

O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é amplamente utilizado no controle de sistemas devido à sua simplicidade e eficiência na correção de erros e na otimização do desempenho do sistema. Este controlador ajusta a ação de controle com base em três componentes principais: proporcional (P), integral (I) e derivativo (D), que, combinados, oferecem uma solução robusta para diversas aplicações em engenharia de controle. Cada um desses termos desempenha um papel distinto na minimização do erro, que é definido como a diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor real do sistema.

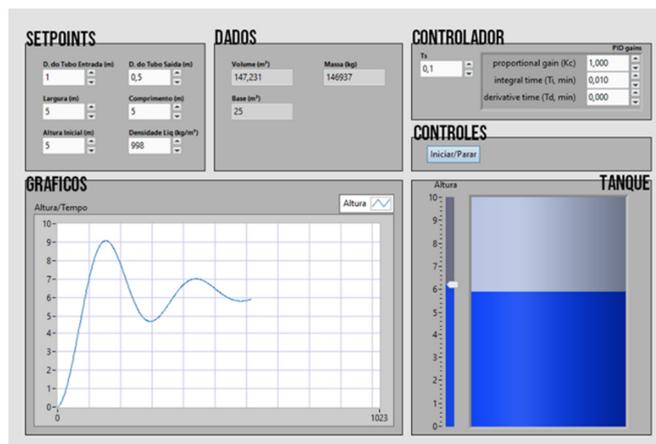
- **Termo Proporcional (P):** Este termo ajusta a saída do controlador de maneira diretamente proporcional ao erro. Quanto maior o erro, maior será a ação de controle aplicada. O termo proporcional é eficaz para reduzir a resposta inicial do sistema, acelerando o tempo de estabilização. No entanto, ele não é capaz de eliminar completamente o erro estacionário, ou seja, a diferença residual entre o valor desejado e o valor real do sistema após o sistema atingir o estado estável.
- **Termo Integral (I):** Este termo considera o histórico do erro ao longo do tempo, acumulando os erros passados para ajustar a saída do controlador de forma a eliminar o erro estacionário. A ação integral é essencial para garantir que o sistema atinja o valor desejado no longo prazo, corrigindo desvios acumulados e melhorando a precisão geral do controle. Entretanto, a inclusão excessiva de ação integral pode introduzir oscilações e aumentar o tempo de estabilização.
- **Termo Derivativo (D):** O termo derivativo antecipa o comportamento futuro do erro, baseando-se na taxa de variação do erro ao longo do tempo. Ele fornece uma ação corretiva proporcional à derivada do erro, ajudando a suavizar a resposta do sistema e reduzir oscilações ou sobrepassos. A ação derivativa melhora a estabilidade do sistema ao prever mudanças no erro antes que elas se tornem significativas, sendo especialmente útil em sistemas com respostas rápidas.

A combinação adequada dos três termos (P, I e D) define o comportamento dinâmico do sistema controlado. O ajuste preciso dos parâmetros do controlador PID determina se a resposta do sistema será subamortecida, criticamente amortecida ou superamortecida, conforme

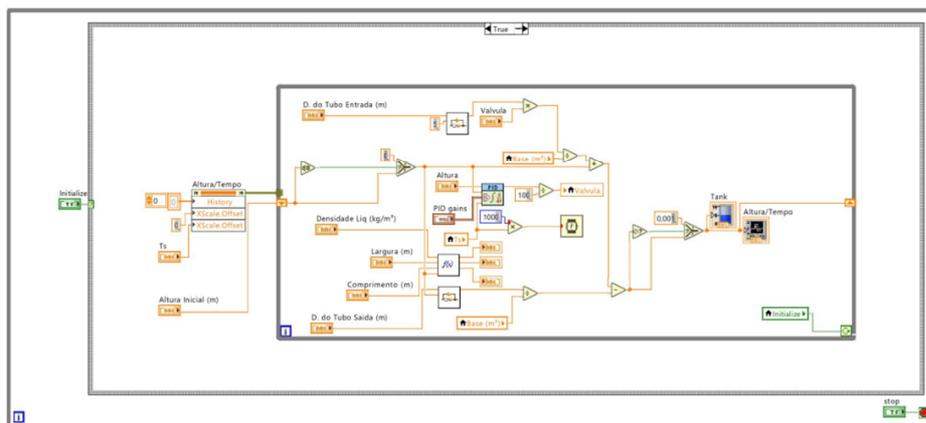
discutido no modelo de sistema massa-mola-amortecimento. Estudos indicam que o controlador PID, quando devidamente sintonizado, é eficaz para controlar uma ampla variedade de sistemas, desde processos industriais até sistemas de controle em engenharia mecânica e elétrica, garantindo uma resposta estável e eficiente em diversas condições operacionais.

Pesquisas científicas sugerem que, embora o PID seja uma ferramenta poderosa, a sua sintonização pode ser desafiadora, especialmente em sistemas complexos ou não lineares. Técnicas modernas, como algoritmos de otimização e aprendizado de máquina, têm sido exploradas para aprimorar o ajuste automático dos parâmetros PID, melhorando ainda mais seu desempenho em aplicações avançadas. A Figura (6) apresenta uma simulação de planta com Controlador PID.

Figura 6: a) Simulação de Planta com Controlador PID, b) código fonte da simulação.



(A)



(B)

Fonte: Própria (2024).

Controlador Fuzzy

O controlador Fuzzy, ou controlador difuso, é uma abordagem de controle que utiliza a lógica fuzzy, uma extensão da lógica booleana que permite lidar com incertezas e imprecisões nos sistemas. Enquanto o controlador On/Off, conforme discutido anteriormente, opera com

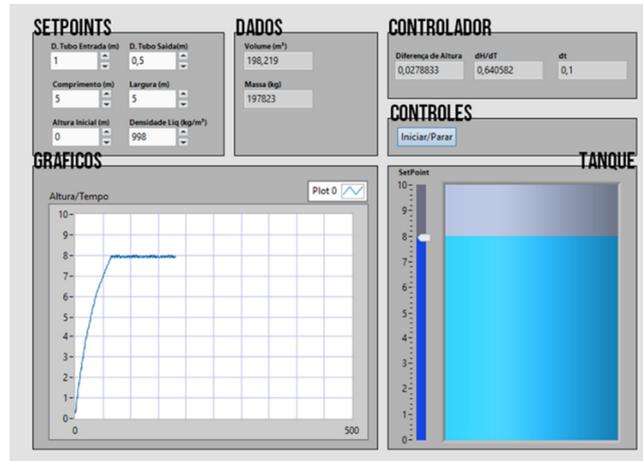
lógica booleana primitiva, o controlador Fuzzy emprega valores contínuos que representam graus de verdade, possibilitando uma modelagem mais flexível e intuitiva de sistemas complexos e não lineares. Essa característica permite que o controlador Fuzzy gere resultados intermediários entre os estados “ligado” e “desligado” do atuador, proporcionando um controle mais refinado.

A aplicação do controlador Fuzzy envolve várias etapas:

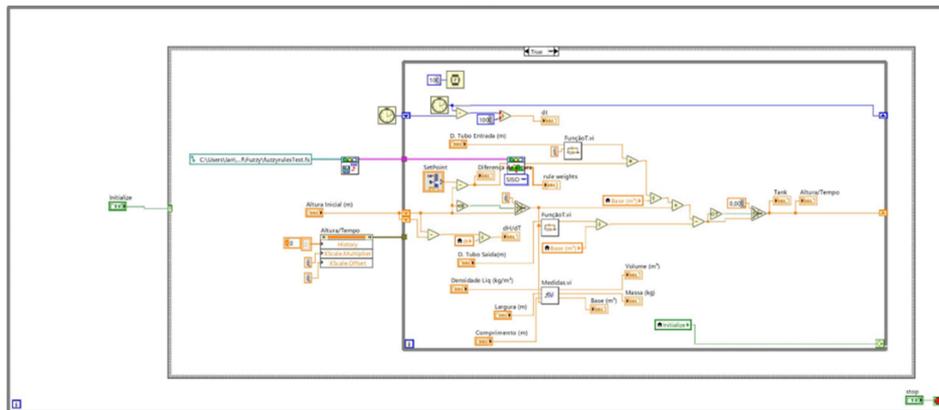
- **Análise do Sistema:** Esta fase consiste na identificação do funcionamento da planta, incluindo a definição das variáveis de controle e das variáveis controladas. No contexto da planta em estudo, as variáveis são o nível do tanque e a vazão do fluido, que precisam ser monitoradas e ajustadas de maneira eficiente.
- **Inferência Fuzzy:** Este processo aplica regras fuzzy às variáveis de entrada para determinar os conjuntos fuzzy de saída. As regras fuzzy são formuladas com base no conhecimento do sistema, permitindo que o controlador leve em consideração as nuances do comportamento do sistema em diferentes condições operacionais.
- **Método de Defuzzificação:** Esta etapa converte o conjunto fuzzy de saída em um valor crisp, que é um valor preciso que pode ser aplicado diretamente ao sistema. Neste projeto, utilizou-se o método do centro de gravidade para realizar essa defuzzificação, uma técnica que proporciona um resultado representativo da distribuição fuzzy.

Comparado ao controlador On/Off, o controlador Fuzzy demonstra uma clara diferença em termos de desempenho. No gráfico gerado, é possível observar que o erro de regime permanente é significativamente menor em relação ao setpoint estabelecido. Embora o erro de regime permanente sempre esteja presente na resposta do sistema, a otimização dos parâmetros do controlador Fuzzy permite sua redução, resultando em uma resposta mais estável e eficiente. Estudos demonstram que controladores Fuzzy são especialmente úteis em sistemas onde a modelagem matemática precisa é complexa ou inviável. Eles têm se mostrado eficazes em uma variedade de aplicações, desde controle de temperatura em processos industriais até sistemas de controle de robôs e veículos autônomos. Além disso, a lógica fuzzy proporciona uma maneira intuitiva de incorporar o conhecimento humano no design do controlador, facilitando a implementação de regras de controle baseadas em experiência prática. A Figura (7) apresenta uma simulação de planta com controlador Fuzzy.

Figura 7: a) Simulação de Planta com Controlador Fuzzy, b) código fonte da simulação.



(A)



(B)

Fonte: Própria (2024).

Assim, o controlador Fuzzy se destaca como uma alternativa poderosa para o controle de sistemas dinâmicos, apresentando vantagens significativas em termos de adaptabilidade e precisão, especialmente em ambientes onde a variabilidade e a incerteza são predominantes.

Caldeira

Nesta seção do laboratório, foi realizada a integração de todos os conceitos abordados nos tópicos anteriores por meio da aplicação do controlador fuzzy em uma planta que simula os princípios físicos de operação de uma caldeira. Esta integração inclui a incorporação de parâmetros críticos, como pressão e temperatura, à planta anteriormente discutida. Para tal, foi imprescindível o desenvolvimento de um modelo matemático fundamentado na Segunda Lei da Termodinâmica, aliado aos conceitos físicos da planta inicial, permitindo estabelecer uma correlação entre pressão, temperatura, nível e vazão. Essa abordagem garante que as alterações em um parâmetro influenciem de maneira interdependente os demais.

Com a adição das variáveis de temperatura e pressão ao projeto, tornou-se necessário

implementar atuadores e medidores adequados, de modo a assegurar a precisão das variáveis monitoradas. Para o controle de temperatura, estabeleceu-se uma relação entre a quantidade de gás que sai da caldeira e a temperatura do líquido, fundamentada em um modelo matemático que quantifica esta interação. Esse modelo possibilitou a implementação de uma válvula de escape para a queima de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), um combustível amplamente utilizado na indústria. A válvula de escape do sistema permitiu a liberação controlada do gás, possibilitando a observação da variação da temperatura no sistema de forma precisa.

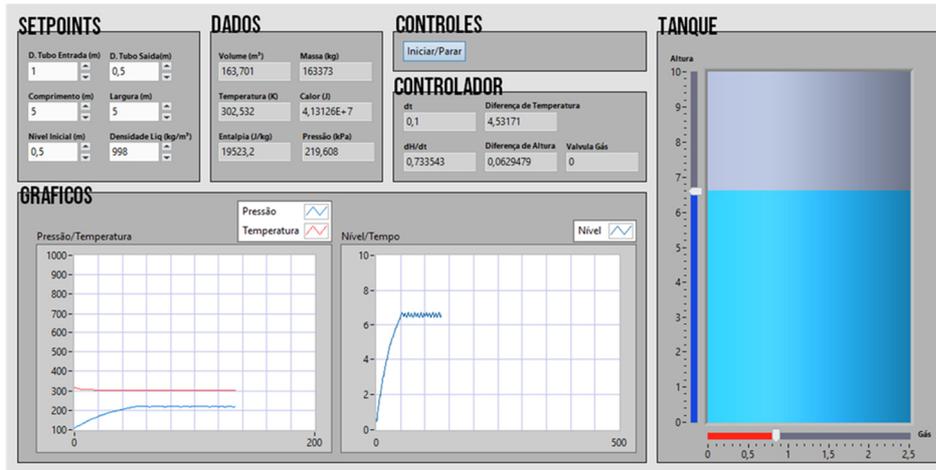
Para a medição da pressão, considerou-se a utilização de um medidor hidrostático de nível, que avalia a pressão na base do tanque, sendo fundamental para a exatidão no controle do processo. A partir do modelo matemático desenvolvido, foi possível correlacionar a pressão ao nível do tanque, assegurando, assim, medições precisas e confiáveis.

A escolha do controlador fuzzy para esta aplicação foi motivada por sua flexibilidade e capacidade de lidar com incertezas, características que se mostraram essenciais para o sucesso do projeto. O controlador fuzzy apresenta um erro de regime permanente reduzido, contribuindo para a estabilidade e eficiência do sistema de controle. As regras fuzzy foram elaboradas de maneira a interligar as variáveis de controle às variáveis controladas, permitindo uma resposta adaptativa às condições dinâmicas do sistema.

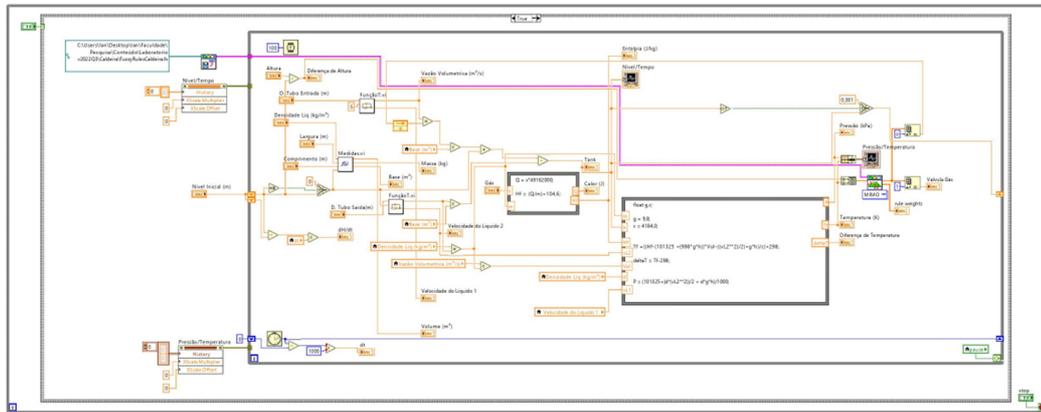
Os resultados obtidos são apresentados graficamente, evidenciando a relação entre as variáveis monitoradas e controladas. Esses resultados demonstram a eficácia do controlador fuzzy na gestão das interações complexas entre pressão, temperatura e nível, corroborando a literatura que destaca a aplicabilidade de controladores fuzzy em sistemas dinâmicos não lineares e a sua superioridade em relação a controladores tradicionais em ambientes com incertezas.

A Figura (8) apresenta uma simulação de caldeira com controlador Fuzzy, e a Figura (9) apresenta uma superfície Fuzzy relacionando as variáveis de controle e controladas.

Figura 8: a) Simulação de Caldeira com Controlador Fuzzy, b) código fonte da simulação.



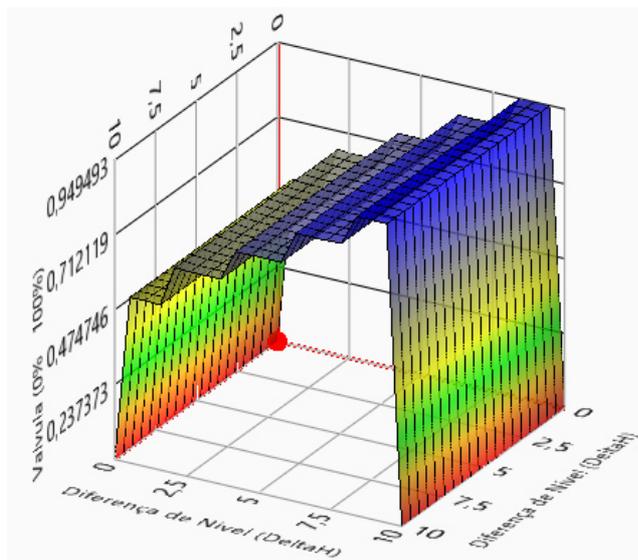
(A)



(B)

Fonte: Própria (2024).

Figura 9: Relação Variáveis de Controle e Controladas fuzzy.



Fonte: Autoria própria

Esta seção do laboratório não apenas reproduziu de maneira precisa as dinâmicas de um ambiente industrial controlado, mas também proporcionou uma plataforma robusta para a realização de testes e análises detalhadas. Essa abordagem permite que a simulação funcione como uma ferramenta teórica poderosa para a análise de sistemas de controle, contribuindo significativamente para a compreensão dos mecanismos subjacentes que governam o comportamento dinâmico dos sistemas industriais.

CONCLUSÕES

A implementação de um laboratório virtual utilizando o software LabVIEW revelou-se uma abordagem eficaz para a simulação e análise de controladores industriais em contextos educacionais e de pesquisa. Este projeto possibilitou a construção de um simulador robusto, apto a emular controladores On/Off, PID e Fuzzy, proporcionando uma plataforma abrangente para a análise comparativa de suas performances em diversos cenários operacionais.

A estruturação do laboratório virtual incluiu o desenvolvimento da planta do tanque, a qual foi modelada matematicamente com base em princípios físicos reais, permitindo uma correlação precisa entre variáveis críticas, como pressão, vazão, nível e temperatura. O emprego de controladores PID, Fuzzy e On/Off na simulação facilitou uma compreensão detalhada do comportamento de cada controlador em situações práticas, ressaltando suas vantagens e limitações específicas. Estudos anteriores demonstraram que simulações em ambientes virtuais podem proporcionar uma plataforma eficaz para o ensino de controle de sistemas, permitindo que os alunos explorem conceitos teóricos de forma prática e interativa.

Os resultados obtidos evidenciaram que o ambiente virtual criado é capaz de replicar de maneira fidedigna as dinâmicas de um sistema de controle industrial, possibilitando a visualização e análise dos efeitos dos diferentes controladores sobre o processo. A utilização de simuladores de primeira e segunda ordem, juntamente com sistemas massa-mola-amortecimento, contribuiu para a compreensão das respostas dinâmicas dos controladores, fortalecendo a análise teórica e prática.

Adicionalmente, a criação deste laboratório virtual não apenas resultou em uma significativa economia de recursos que seriam necessários para a implementação física de sistemas equivalentes, mas também proporcionou uma ferramenta de ensino e treinamento de alta qualidade. Esse ambiente de simulação se configura como um recurso valioso para instituições de ensino e para a capacitação de profissionais, promovendo um entendimento profundo dos sistemas de controle industrial e preparando os alunos para enfrentar os desafios do setor.

Portanto, a adoção de plataformas virtuais de simulação, como a proposta neste projeto, não apenas enriquece a experiência educacional, mas também contribui para a formação de profissionais capacitados em um campo em constante evolução.

REFERÊNCIAS

DORF, R. C. **Sistemas de Controle Moderno**. 8^a. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, v. I, 2001.

HALLIDAY, D. **Fundamento de Física**. 9^a. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, v. II, 2012.

HALVORSEN, P. H. **Control and Simulation in LabVIEW**. Telemark University College. Porsgrunn, p. 54. 2011.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5^a. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, v. I, 2014.

SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2^a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, v. I, 2007.

